円偏波ペア素子を用いる SHF 帯ビームチルト型平面アンテナ

正会員 羽 石 操[†], 齊 藤 作 義[†]
皆 瀬 淳^{††}

あらまし 本研究では、広帯域な円偏波特性を呈する円偏波ペア素子と、この円偏波ペア素子よりなる新しいタイプのビームチルト型円偏波平面アンテナの提案をなし、その構成法および放射特性等につき検討を加え、この種のアンテナ系を構成する際重要となる設計基礎資料を得た。

また、これらの結果を用い、所望の帯域内 (11.7~12.0 GHz) で、チルト角約 30°, 主ビーム方向の軸比約 0.5 dB, 入力定在波比 1.5 以下の良好な特性を呈する新しいタイプの多素子ビームチルト型円偏波平面アンテナを実現した。

さらに、このビームチルト型平面アンテナを用いて、衛星放送の受信実験を行ったところ、良好な受信画像が得られ、この種のアンテナ系が簡易型の衛星放送受信用平面アンテナとして有用な一形式となり得ることを明らかにした。

1. ま え が き

最近の電子機器のうすせいは、小型化にあり、薄型化にあり、軽量化にある。このような動向を反映し、薄型で平面構造を有するロープロファイルアンテナ、すなわち平面アンテナに関する研究が盛んに進められ¹⁾、UHF から SHF 帯にかけ種々の応用分野を見いだしつつある^{2)~9)}。

このような動向のもとに、ここ数年、衛星放送受信用アンテナについても、これら技術の導入が積極的になされ、種々のタイプの平面アンテナが提案されてきた⁵⁾⁶⁾¹⁰⁾。

このうち、図 1 に示すビームチルト型平面アンテナ⁵⁾⁶⁾については、ブロードサイド型の平面アンテナに比べ建造物等への取り付けの容易なことから、最近、特に着目されるようになってきた。

本研究では、広帯域な特性を呈するマイクロストリップ円偏波ペア素子 (以後、ペア素子)¹¹⁾を用いる新しいタイプのビームチルト型平面アンテナの提案をな

図 1 平面アンテナとそのセッティング
Typical arrangement for planar antennas.

し、その構成法および放射特性等につき検討を加え、この種のアンテナを構成する際重要となる設計基礎資料を得た。

すなわち、①広帯域ペア素子よりなる円偏波平面アンテナの構成法と、その基本放射特性につき考察を加え、この種のアンテナ系が広帯域な円偏波平面アンテナとして作動し得ることを明らかにした。

また、②本ビームチルト型円偏波平面アンテナにつき、そのビームチルト角 (以後、チルト角) と素子間設定位相量との関係、およびこのチルト角の周波数依存性等について考察を加え、この種のアンテナ系を構成する際重要となる設計基礎資料を提示した。

③これらの結果を用い、チルト角約 30°, 主ビーム

[†] 埼玉大学 工学部電気工学科

^{††} 八木アンテナ株式会社 大宮工場

"Beamtitled SHF Planar Antenna Composed of Microstrip Paired-Element" by Misao Haneishi, Sakuyoshi Saito (Faculty of Engineering, Saitama University, Urawa) and Atsushi Kaise (Yagi Antenna Co., Ltd., Omiya)

方向での軸比約 0.5 dB, 定在波比 1.5 以下の良好な特性を呈する新しいタイプの多素子ビームチルト型平面アンテナを実現し, この種のアンテナ系が衛星放送受信用円偏波平面アンテナとして有用な一形式となり得ることを明らかにした。

2. 供試アンテナの基本構成

本章では, この種のアンテナを構成する際重要となるサブアレイ (subarray) と, そのサブアレイの対称配列よりなる多素子円偏波面アレイの基本構成法につき述べる。なお, 本平面アンテナを衛星放送受信用平面アンテナとして供する場合には, 後述のように 1024 素子程度の素子数が要求される。

2.1 円偏波ペア素子とそのサブアレイユニット

ペア素子の基本構成を図 2(a) に示す。このペア素子は, 同一素子形状の一对の円偏波マイクロストリップアンテナを, 同一平面上で空間的に $(\pi/2)$ だけ回転配列し, しかも, それへの給電位相を $(\pi/2)$ だけ制御し, 軸比およびそのインピーダンス特性の広帯域化を図ったものである。このように円偏波ペア素子を構成すると, その軸比およびインピーダンス特性等が極めて広帯域になることが知られている¹¹⁾。

また, 多素子円偏波平面アンテナの基本構成要素となるサブアレイユニット (以後, SAU) は, この 2 組のペア素子よりなり, その給電系は図 2(b) のように, $\lambda_g/4$ インピーダンス変成器 (λ_g : 線路の伝搬波長) T_a, T_b, T_c, T_m 等によって, 主給電点である M 点にて主給電線路 M_1 と整合が取れるように設計されている。

さらに本供試 SAU については, 主給電点 M から各ペア素子への給電線路長を制御し, 所望のチルト角 θ_m を実現するために必要とされる素子間設定位相 ϕ_m を得, 図 2 の xz -面内における 1 次元のビームチルト化を達成している。

また, この SAU の素子間隔については, 以下の方法により決定した。すなわち, チルト面内 (xz -pl) では, ビームチルト化に必須な素子間設定位相 ϕ_m に起因するグレーティングローブの発生を抑制するため素子間隔を狭くとり, $(d_1/\lambda_0)=0.6(\lambda_0$: 自由空間波長) に設定し, 非チルト面内 (yz -pl) においては, 高利得化のためチルト面内には比素子間隔を広くとり¹²⁾, $(d_2/\lambda_0)=0.8$ となるよう設計した。

2.2 円偏波面アレイの基本構成

基本サブアレイ (4×4 素子) は, 多素子面アレイを構成する際の基本要素であり, 図 3(b) のように, 同

$$F_1 = F_2 \exp(-j\frac{\pi}{2})$$

(a) ペア素子

$$d_1 = 0.6\lambda_0, d_2 = 0.8\lambda_0$$

(b) ビームチルトタイプサブアレイユニット

図 2 ペア素子とそのサブアレイユニット
Microstrip paired-element and subarray-unit.

(a) サブアレイユニット (b) 16 素子 (c) 64 素子

(d) 256 素子 (e) 1024 素子

(U₁ - U₄: 256 素子サブアレイ)

512 素子 1024 素子

(f) 給電系

図 3 供試アレイの素子配列
Integration of test planar array.

一平面上で4組のSAUを対称配列することによって構成される。また、より素子数の多い多素子面アレイは、図3(c), (d)のように、この基本サブアレイを所望の数だけ対称配列することによって構成することができる。

したがって、この種のアンテナ系においては、SAU ないしはその基本サブアレイの構成法が把握されると、任意の素子数の平面アンテナの設計が可能となる。

2.3 多素子平面アレイの素子数と利得の関係

この種のアンテナ系の素子数と利得の関係を算出し、図4を得た。これより、給電損失等が無視し得る場合、すなわち開口効率 η が100%の理想的な平面アンテナ系においては、512素子程度の平面アンテナにおいて35 dB程度の利得が得られることが明らかにされた。一方、本供試アンテナの主ビーム方向における開口効率 η は、実測によると後述のように、512素子で45%程度の値を呈することが知られている。本土中央部の強電界地域における衛星放送の簡易受信を想定すると、実効利得 G_a としては、32~34 dBi程度の値が要求されるので、この値を設計の目安として選定した。したがって、本供試平面アンテナの開口効率 η を考慮にいと、衛星放送受信用平面アンテナとしてこの種の円偏波アンテナ系を供するためには、図4の利得特性より、512 ないしは 1024 素子程度の素子数が必要となる。

さらに、この種のアンテナ系においては、素子数の増加にともない給電用ストリップ線路からの給電損失が増加するので、この給電損失を考慮にいて多素子平面アンテナを構成することが要求される。この給電

損失を低減させる代表的手法としては、多素子平面アレイを100素子程度のサブアレイパネル(以後、SAP)に分割し、その各々のSAPを導波管系の低損失分配器にて給電し、高効率化を達成する方法が主として採られている¹³⁾¹⁴⁾。

本研究においても、図3(f)のように、同一基板上に構成された256素子のSAP、すなわち、 U_1 - U_4 を導波管系の低損失分配器で2面ないしは4面並列給電し、給電系からの損失を低減させ、この種のアンテナ系の高効率化を図った。

なお、各素子への振幅分布については、ここでは利得に着目し、均一分布に設定した。また、供試低損失アンテナ用基板としては、厚さ0.6 mmの架橋ポリエチレンガラスファイバ基板($\epsilon_r=2.51$, $\tan \delta=1.6 \times 10^{-3}$, $\sigma=5.8 \times 10^7$ S/m)を用いた。

3. ビームチルト型平面アンテナの放射特性

この種のビームチルト型平面アンテナの設計資料を得るため、本アンテナ系の主要パラメータであるチルト角 θ_m と、設定パラメータ(素子間設定位相量 ϕ_m およびチルト面内の素子間隔 d_1)との関係を算出し、図5を得た。

このチルト角 θ_m については、 ϕ_m および d_1 を適切に選定すれば任意に設定可能であるが、ここでは放送衛星の仰角を考慮にいて、 $\theta_m=-30^\circ$ を設計の目安として選んだ。

また、素子間隔 d_1 については、前述のように素子間設定位相量 ϕ_m に起因するグレーティングローブの発生を抑制するため、 $d_1=0.6\lambda_0$ とし、素子間設定位相量 ϕ_m については、このチルト角 $\theta_m=-30^\circ$ に着目し図5の設計値により、 $\phi_m=110^\circ$ と決定した。

図4 素子数と利得
Element-numbers and directivity gain.

図5 設定パラメータとチルト角
Tilt-angle variations as function of phase setting and element spacing.

図 6 サブアレイパネルのパターン(チルト面)
Radiation pattern of test subarray-panel (xz-pl).

図 7 1024 素子平面アンテナのパターン(チルト面)
Radiation pattern of completed 1024-element planar antenna (xz-pl).

図 8 主ビームの周波数特性
Frequency characteristics of mainbeam position.

このように諸設定パラメータが決定された、256 素子 SAP (16×16 素子) につき、そのチルト面内におけるパターンを算定したところ、図 6 の結果を得た。

左右のサイドローブは、供試円偏波マイクロストリ

ップアンテナ素子のエレメントパターンの影響を受け、若干非対称になっているが、主ビームおよびその近傍のサイドローブについては良好な特性が得られた。

次いで、この 256 素子 SAP 4 面よりなる 1024 素子平面アンテナ (32×32 素子) のチルト面内におけるパターンを求め、図 7 を得た。主ビームおよびその近傍のサイドローブは良好な特性を示し、しかも、広角方向 ($\theta \geq 0^\circ$) のサイドローブレベルも最悪値で -27 dB まで抑制されている。

一方、この種のビームチルト型平面アンテナにおいては、周波数変化と共に、チルト角 θ_m が変動し、所望方向における利得変動を伴うことが予想される。

そこで、上記の設計手法により決定された諸設定パラメータを有する 1024 素子平面アンテナにつき、所望の帯域内 (11.7~12.0 GHz) におけるチルト角の周波数依存性を算出し、図 8 を得た。

これより、帯域内におけるチルト角変化による利得低下分は、最悪値で 0.2 dB 程度であり、本アンテナ系が広範囲な周波数領域で良好な特性を呈することが計算により明らかにされた。

4. 実験結果および検討

簡易型衛星放送受信用平面アンテナへの応用を想定し、SAP 2 面よりなる 512 素子ビームチルト型円偏波平面アンテナ (16×32 素子, $0.32 \times 0.49 \text{ m}^2$) を試作し、その一例を写真 1 に示した。

本供試アンテナについては、所望の帯域内で軸比約 0.5 dB、入力定在波比 1.5 以下の値が得られ、主ビーム方向の実効利得 G_a については、現在のところ、図 9 のように約 30.7 dBi (開口率 $\eta = 45\%$) の値が得

写真 1 供試 512 素子平面アンテナ
Typical sample for 512-element.

図 9 利得の周波数特性(512 素子)
Frequency characteristics of gain. (512-element)

写真 2 供試平面アンテナの一試作例
Typical sample for completed 1024-element planar antenna.

図 10 実測パターンの一例
Typical pattern for completed 1024-element planar antenna.

られている。

この簡易型平面アンテナを用い衛星放送の受信実験を行ったところ、予期した通り良好な受信画像が得られた。

次いで、この種の平面アンテナをさらに高利得化するため、写真 2 に示す 1024 素子ビームチルト型平面アンテナ (32×32 素子, 0.49×0.64 m²) を試作し、その放射特性につき詳細に検討を加えた。すなわち、チ

図 11 利得の周波数特性 (1024 素子)
Frequency characteristics of gain. (1024-element)

図 12 軸比の周波数特性(1024 素子)
Frequency characteristics of axial-ratio. (1024-element)

ルト面内においてそのパターンを実測したところ、図 10 のように、 $\theta_m = -30.6^\circ$ のチルト角が得られ、この θ_m は設計値と良い一致をみた。また、主ビームおよびその近傍のサイドロブについても、設計上有意な範囲で実測値は計算値と良い一致を見た。

さらに、非チルト面内 (主ロブを含む面) についてもそのパターンを実測したところ、その近軸パターンは設計値とほぼ一致し、しかも、広角方向 ($|\theta| > 30^\circ$) のサイドロブレベルも -35 dB 以下まで抑制された。

本供試平面アンテナの主ビーム方向での実効利得 G_a については、現在のところ、図 11 のように最大で 33.3 dBi (開口効率 $\eta = 41\%$) 程度の値が得られ、帯域内の利得変動についても ± 0.1 dB 以下の特性が得られた。

簡易受信用の 50 cm 径のオフセットパラボラの標準的利得性能としては、現在のところ実効利得 $G_a = 34$ dBi (開口効率 $\eta = 70\%$) 程度のものが多く用いられているので¹⁵⁾、ほぼ同程度の実効利得が実現されたものと考えている。

さらに、軸比としては、図 12 のように帯域内で約 0.5 dB、入力定在波比についても 1.5 以下の良好な値が得られた。

また、図 8 に示すビーム偏位による利得低下分を考

慮すると、帯域内で ± 0.2 dB 程度の利得変動を呈するものと考えている。

これらの結果より、本供試平面アンテナが軸比およびインピーダンス特性を含め、広帯域な特性を呈することが明らかにされた。

さらに、導波管系の4分配器の特性改善等が成されれば、 G_a および η 共に512素子と同様な傾向を示すものと考えられる。

なお、本円偏波平面アンテナにおいては、前述のようにその基本構成要素であるサブアレイユニットの設計法が確立されると、原理的には任意の素子数の平面アンテナの構成が可能となるため、極めて設計性に優れたアンテナ系と考えられる。

5. む す び

円偏波ベア素子よりなる新しいタイプのビームチルト型平面アンテナを提案し、その構成法および放射特性等につき検討を加え、この種のアンテナ系が広帯域な円偏波平面アンテナとして有用な一形式となり得ることを明らかにした。

また、このビームチルト型平面アンテナのチルト角と素子間設定位相量との関係を求め、かつ、そのチルト角の周波数依存性などについても考察を加え、この種のアンテナ系を構成する際重要となる設計基礎資料を得た。

次いで、導波管系の低損失分配器でサブアレイパネル(256素子)を対称給電する平面アンテナの構成法についても検討を加え、所望の帯域内で、軸比約0.5 dB、入力定在波比1.5以下、最大実効利得 $G_a=33.3$ dBi(開口効率 $\eta=41\%$)、ビーム偏位による利得低下分0.2 dB(計算値)を含めた利得変動 ± 0.2 dB以下の良好な特性を実現し、この種のアンテナ系の高利得化への見通しを得た。

なお、用途によっては電氣的特性のいっそうの改善および温度特性、耐候性などに関するより厳密な検討が必要となる。また、本研究の一部は(財)放送文化基金の援助のもとに行われた。

(昭和61年11月4日受付、昭和62年2月16日再受付)

【参 考 文 献】

- 1) 羽石：“平面アンテナ”，テレビ誌，38，11（1984）
- 2) R. J. Mailloux, et al.：“Microstrip Array Technology”，IEEE Trans., AP-29, 1, pp. 25-37 (Jan., 1981)
- 3) 手代木ほか：“衛星用Sバンドマルチビームアレーアンテナの開発”，昭59信学総全大，S19-10
- 4) 久田ほか：“合成開口レーダ・アンテナ系の試験結果”，昭59信学総全大，802
- 5) 羽石，斉藤，皆瀬：“ビームチルト型マイクロストリップ円偏波用平面アレイ”，信学技報，AP 85-90 (Dec., 1985)
- 6) 西村ほか：“サイドルッキング円偏波マイクロストリップアレーアンテナ”，昭59信学総全大，728
- 7) 大森ほか：“円偏波マイクロストリップアンテナを用いた電子走査アンテナ”，信学技報，AP 81-104 (Nov., 1981)
- 8) 大鐘ほか：“円パッチマイクロストリップアンテナを用いたレクタナの基礎的研究”，信学技報，AP 84-40 (Nov., 1984)
- 9) 中岡ほか：“マイクロストリップラインスロットアレーを利用した多素子平面アレー”，昭54信学総全大，S6-3
- 10) 安藤ほか：“ラジアルラインスロットアンテナの試作特性”，昭60信学総全大，S6-3
- 11) 羽石，吉田，後藤：“パッチアンテナとそのベア”，信学技報，AP 81-102 (Nov., 1981)
- 12) 後藤，神山：“2周波共用アレーアンテナの素子配列法と利得”，信学技報，AP 81-40 (June, 1986)
- 13) 羽石ほか：“マイクロストリップ円偏波ベア素子を用いるアレーアンテナ”，信学技報，AP 83-64 (Sep., 1983)
- 14) L. Sikes and K. Kellogg：“A Scatterometer Antenna Composed of Microstrip Subarrays”，IEEE 1985AP-S Digest, pp. 723-726 (June, 1985)
- 15) 例えば熊本ほか：“衛星放送用受信機”，昭60信学総全大，S6-5

はねいし みさお
羽石 操 昭和44年、東京都立大学大学院修士課程修了。同年、埼玉大学工学部電気工学科助手。以来、表面波アンテナ、マイクロストリップアンテナおよび平面アンテナ等の研究に従事。現在、同大学助教授。工学博士。正会員。

さいとう さくよし
斉藤 作義 昭和50年、川越工業高校電気科卒業。大日本印刷(株)を経て、52年、埼玉大学工学部電気工学科技官。57年、東京電機大学工学部第二部電気工学科卒業。現在、マイクロストリップアンテナの研究・開発に従事。

かいせ あつし
皆瀬 淳 昭和38年、東北大学工学部通信工学科卒業。同年、八木アンテナ(株)設計部に入社。以来、各種アンテナの設計・開発に従事。現在、同社第一設計部副部長。